

С. А. МАКОВ

**МАЛОГАБАРИТНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ И ПРИЕМНЫЕ СИСТЕМЫ
ВЫСОКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ**

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 22 V 1940)

Для направленного излучения волновой энергии механической или электрической природы обычно применяют излучатели или системы их, достаточно большие по сравнению с длиной рабочей волны. Из малых, по сравнению с длиной волны, практически осуществимых направленных излучателей известны лишь двойные противофазные источники—диполи, но их направленность невелика. В радиотехнике, хотя и известны некоторые методы построения высоконаправленных малогабаритных систем^(1,2), но все же предложенные до сих пор системы обладают хорошей направленностью лишь в узком диапазоне частот и весьма требовательны к стабильности режима их питания. В акустической технике реальные остро-направленные излучатели и приемники, малые по сравнению с длиной рабочей волны, неизвестны.

В настоящем сообщении даются решение задачи и практические примеры получения остронаправленного излучения или приема с помощью довольно простых систем излучателей или приемников, имеющих малую, по сравнению с длиной волны, пространственную протяженность, при практически постоянной направленности в пределах широкого диапазона частот. Решение базируется, во-первых, на использовании разности характеристик направленности различных, мало направленных излучателей или приемников и, во-вторых, на рациональном использовании принципа произведения характеристик направленности.

Установлено, что, совмещая два малых, слабо направленных излучателя* с мало разняющимися друг от друга характеристиками направленности, и заставляя их работать в противофазе, с надлежащим образом выбранными амплитудами, можно получить систему, обладающую значительной направленностью. Направленное действие ее сохраняется при каком угодно увеличении рабочей длины волны. Еще большей остроты направленности можно достигнуть применением комбинаций из нескольких таких систем, причем особенно выгодно применять схемы комбинаций, использующие тот же разностный эффект. Характеристика направленности, комбинации из нескольких одинаковых и одинаково ориентированных систем выражается произведением характеристик направленности

* Те же рассуждения справедливы в отношении приемников; упоминание о приемниках мы в дальнейшем опускаем лишь для сокращения текста.

единичной системы и аналогичной комбинации ненаправленных излучателей⁽³⁾. Строя схему комбинации аналогично схеме расположения излучателей в элементарной системе и применяя аналогичное распределение относительных амплитуд и фаз в ней, получим вторую степень характеристики направленности элементарной системы. Многократно повторяя этот прием, можно получить групповой излучатель любой степени направленности. Понятно, что при геометрическом совпадении нескольких источников в подобных комбинациях в местах совпадения надлежит применять источники с суммарной интенсивностью*. Поскольку размеры элементарных систем, составленных по такому принципу, могут быть как угодно малыми по сравнению с длиной рабочей волны, достаточно малым может быть сделан и весь групповой излучатель.

Приведем несколько примеров малогабаритных высоконаправленных систем.

Прямолинейные системы, направленные вдоль нормальных к ним плоскостей. Простейшим примером малогабаритной прямолинейной системы, обладающей острой направленностью вдоль нормальной к ней плоскости, является система из трех точечных источников a , b и c (фиг. 1). Крайние источники a и b , равной интенсивности, работают синфазно и отстоят друг от друга на расстоянии d , малом по сравнению с длиной излучаемой волны λ . Интенсивность и фаза центрального источника c выбраны такими, что потенциал от него в направлении BB' равен потенциалу от пары источников a и b и противоположен ему по знаку. Характеристика направленности этой системы представляет собою разность характеристик направленности пары a , b и источника c и имеет вид:

$$R'_a = \frac{\cos Z - \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)}{1 - \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)},$$

где $Z = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha$, α — угол между направлением наблюдения и нормальной к излучающей системе плоскостью OO' (фиг. 1). Можно показать, что для малых значений $\frac{d}{\lambda}$, $R'_a \approx \cos^2 \alpha$ (фиг. 2, кривая R'_a), т. е. характеристика направленности не зависит от $\frac{d}{\lambda}$. Практически направленность остается постоянной для диапазона $0 < \frac{d}{\lambda} < 0,5$.

Направленность описанной системы уже достаточно остра, причем отсутствуют вторичные максимумы. Однако можно получить еще большую направленность, стабильную в широком диапазоне частот, применяя описанный выше метод суперпозиции нескольких систем. Например, с помощью 5 источников может быть получена направленность $R'_a{}^2 \approx \cos^4 \alpha$ (фиг. 2, кривая $R'_a{}^2$).

Подобные системы могут найти применение в вертикальных круговых излучателях.

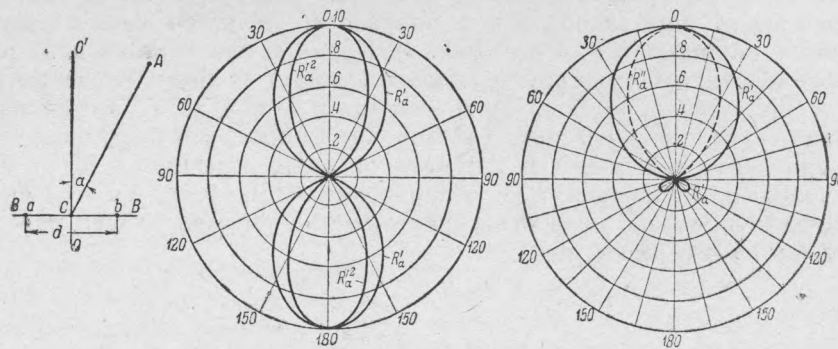
Прямолинейные системы, направленные вдоль линии источников. Система из трех источников a , b , c (фиг. 1) может быть сделана направленной и вдоль линии источников. Для этого необходимо лишь изменить интенсивность центрального источника c так, чтобы потенциал от него в направлении OO' был равен и противоположен

* Под интенсивностью здесь и далее следует понимать потенциал от данного источника в точке наблюдения для изучающих систем и чувствительность данного приемника — для приемных систем.

потенциалу от пары a, b . Характеристика направленности системы при этом примет вид:

$$R'_\alpha = \frac{1 - \cos Z}{1 - \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)}.$$

При малых значениях $\frac{d}{\lambda}$ (практически до $\frac{d}{\lambda} = 0,5$) она обращается в $R'_\alpha \approx \sin^2 \alpha$, т. е. опять-таки не зависит от $\frac{d}{\lambda}$. Отсчитывая (как это принято) угол наблюдения α от направления максимального излучения, повернутого в данном случае по отношению к предыдущему на 90° , будем иметь при такой системе отсчета $R'_\alpha \approx \cos^2 \alpha$ — характеристику направленности, по форме аналогичную характеристике фиг. 2, но повернутую по отношению к ней на 90° . Заметим, что система a, b, c представляет в данном случае двойной диполь с двумя совмещенными элементами одинакового знака. Это позволяет объяснить направленность ее, вида $\cos^2 \alpha$, пользуясь



Фиг. 1.

Фиг. 2. Характеристики направленности $R'_\alpha \approx \cos^2 \alpha$ и $R''_\alpha \approx \cos^4 \alpha$.

Фиг. 3. Характеристики направленности $R'_\alpha = \cos \alpha (1 + \cos \alpha)$ и $R''_\alpha = \cos^3 \alpha (1 + \cos \alpha)$.

непосредственно принципом произведения характеристик направленности.

Более острая направленность в этом случае также достигается суперпозицией элементарных систем. Для получения направленности вида $R_\alpha \approx \cos^n \alpha$, где n — любое целое число, количество элементов, составляющих систему, должно быть равно количеству членов разложения биномиального ряда: $(a + b)^n$, т. е. $n + 1$; интенсивности этих элементов должны быть пропорциональны коэффициентам этого ряда, а знаки их — чередующимися. Подобные системы и их модификации должны получить широкое применение в практике.

Системы из акустических приемников любого типа, подобные вышеописанным, дадут высоконаправленные двухсторонние микрофоны. Здесь особенно выгодно применять приемники градиента давления, выигрывая этим лишнюю степень направленности.

Системе a, b, c с помощью известных приемов может быть сообщена также и кардиоидная направленность. Используя изложенный выше метод многократного комбинирования систем, можем получить микрофоны с направленностью в виде кардиоиды любой степени: $R_\alpha = (1 + \cos \alpha)^m$.

Смешивание сигналов от элементарных приемников в надлежащей пропорции и фазе, коррекцию частотной характеристики таких микрофо-

нов и компенсацию неизбежной при этом потери чувствительности, не составляет труда выполнить в сопряженных с ними электрических системах.

Сочетанием различных схем приемных систем и различных типов элементарных приемников можно получить весьма выгодную одностороннюю направленность вида $R_\alpha \approx \cos^n \alpha (1 + \cos \alpha)^m$. Отметим, что однонаправленные микрофоны с характеристикой направленности $R_\alpha \approx \cos^n \alpha (1 + \cos \alpha)$ могут быть составлены из двух систем с характеристиками направленности $R_{\alpha_1} = \cos^n \alpha$ и $R_{\alpha_2} = \cos^{n+1} \alpha$. Обе эти характеристики могут быть получены и от одной лишь второй системы, путем надлежащего смешивания сигналов от ее элементов в сопряженной с микрофоном электрической схеме. Характеристики направленности $R'_\alpha = \cos \alpha (1 + \cos \alpha)$ и $R''_\alpha = \cos^3 \alpha (1 + \cos \alpha)$ изображены на фиг. 3.

Те же способы в равной мере могут быть применены для создания не только коротковолновых, но и длинноволновых направленных передающих и приемных антенн малых габаритов.

Двух- и трехмерные малогабаритные высоконаправленные системы. Применение нескольких расположенных в одной плоскости, параллельных друг другу прямолинейных систем, питаемых по методу, обеспечивающему описанный выше разностный эффект, даст систему, остро направленную вдоль одной из ее осей. Отметим, что форма характеристики направленности в пространстве в этом случае не будет телом вращения какой-либо плоской фигуры; она выразится как произведение характеристик направленности системы в двух плоскостях ее симметрии (4).

Характеристику в виде тела вращения даст система из противофазных кругового (кольцевого или поршневого) и точечного источников, расположенных concentрично. Этой системе, путем сообщения надлежащей относительной интенсивности точечному источнику, может быть задана направленность вдоль ее оси, либо плоскости. Направленность системы из кольцевого и точечного излучателей соответственно выразится при этом как

$$R_\alpha = \frac{J_0(Z) - J_0\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)}{1 - J_0\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)}$$

или

$$R_\alpha = \frac{1 - J_0(Z)}{1 - J_0\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)},$$

а системы из поршневого и точечного излучателей как

$$R_\alpha = \frac{\frac{2J_1(Z)}{Z} - \frac{2J_1\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)}{\frac{\pi d}{\lambda}}}{1 - \frac{2J_1\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)}{\frac{\pi d}{\lambda}}}$$

или

$$R_\alpha = \frac{1 - \frac{2J_1(Z)}{Z}}{1 - \frac{2J_1\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)}{\frac{\pi d}{\lambda}}},$$

где $Z = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha$, α — угол между направлением наблюдения и осью системы, d — диаметр кольца или поршня, $J_0(Z)$ — функция Бесселя нулевого порядка, $J_1(Z)$ — функция Бесселя первого порядка.

Можно показать, что при малых значениях $\frac{d}{\lambda}$ эти выражения обращаются соответственно в $R_\alpha \approx \cos^2 \alpha$ или $R_\alpha \approx \sin^2 \alpha$, т. е. направленность практически стабильна, и отсутствуют вторичные максимумы. Применяя концентрическую комбинацию таких систем, возможно получить еще более высокую степень направленности. Подобные системы могут найти применение в акустических излучателях малых габаритов и, в частности, в звуковых прожекторах и в подземных громкоговорителях.

В качестве второго примера малогабаритной плоской системы, обладающей круговой направленностью вдоль своей плоскости, укажем на систему, составленную из двух трехэлементных, взаимно перпендикулярных прямолинейных систем со взаимно перпендикулярными направленностями типа $\cos^2 \alpha$ и с общим центральным источником. Пространственная характеристика направленности этой системы будет телом вращения фигуры $R = \cos^2 \varphi$ вокруг оси, перпендикулярной к плоскости системы. По этому образцу можно построить направленную длинноволновую антенную систему, состоящую из 5 элементарных ненаправленных антенн и дающую возможность получить круговое излучение вдоль поверхности земли (без непроизводительного вертикального излучения энергии). Эта же система позволяет вести однонаправленную или двухнаправленную работу в любом направлении, обеспечивая экономию излучаемой мощности, по сравнению с ненаправленным излучением, от 47% — при круговом излучении и до 87% — при однонаправленной работе. Изменение характера направленности достигается изменением амплитуд и фаз токов в элементарных антеннах. Применяя несколько более сложные комбинации скрещенных прямолинейных систем, возможно получить еще более остро направленные длинноволновые антенные системы.

Применение нескольких одинаковых, расположенных друг за другом плоских малогабаритных систем, надлежащим образом питаемых, даст трехмерные малогабаритные системы, направленность которых легко может быть вычислена с помощью принципа произведения характеристик.

Следует иметь в виду, что описанные выше системы обладают максимальной эффективностью при наибольшем значении $\frac{d}{\lambda}$, после которого в элементарной системе появляются вторичные максимумы. При уменьшении $\frac{d}{\lambda}$ эффективность систем уменьшается, причем это уменьшение происходит тем быстрее, чем выше степень направленности.

Приведенными примерами, разумеется, не исчерпывается все многообразие возможностей использования описанного метода получения высокой направленности. Возможно, например, получение асимметричных характеристик направленности типа $R_\alpha = \sin^n \alpha (1 + \cos \alpha)^m$ или $R_\alpha = \cos^n \alpha (1 + \sin \alpha)^m$ и других специальных характеристик сложной формы.

Отдел акустики Строительства Дворца Советов
Москва

Поступило
26 V 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ J. Wolff, Proc. I. R. E., 25, № 5 (1937). ² А. А. Пистольковский, Изв. электропром. сл. тока, № 1 (1939). ³ H. Stenzel, ENT, 4, 239, (июнь 1927). ⁴ J. Wolff a. L. Malter, Journ. Acoust. Soc. Amer., 2, 201 (окт. 1930).